مطالعه آزمایشگاهی تاثیر اندازه دانه بر مدول برشی کرنش-کوچک خاک‌های دانه‌ای

محمد شریفی پور[۱] ابوالحسن شریفی[۲] امیر ریزه بندی [۳]

چکیده- در محدوده کرنش های کوچک سرعت موج برشی و متعاقب آن مدول برشی یکی از پارامترهای مهم شناخت خواص دینامیکی خاک می‌باشد. در این راستا موضوع شناخت تاثیر اندازه دانه‌ها خاک بر سرعت موج برشی یکی از مسائل مهم می‌باشد. بررسی محققین در گذشته نشان دهنده تاثیر متفاوت اندازه دانه‌های خاک بر مدول موج برشی می‌باشد. هدف این پژوهش بررسی اثرات طیف گسترده ای از اندازه دانه‌های روی مدول برشی در خاک‌های خشک شن و ماسه با استفاده از دستگاه المان خمشی تعبیه شده در سلول سه محوری است. نتایج نشان دهنده حساسیت مدول برشی به تغییرات اندازه‌ی دانه‌های خاک می‌باشد، بطوری‌که در بازه ای از اندازه‌ی دانه‌های خاک با افزایش اندازه قطر دانه‌ها، مدول برشی افزایش و در بازه دیگر با افزایش اندازه‌ی قطر دانه‌ها مدول برشی کاهش می‌یابد.

واژگان‌کلیدی: سرعت موج برشی ؛ خاک دانه‌ای؛ آزمایش المان خمشی؛ مدول برشی؛ رفتار کرنش کوچک

An experimental study on the influences of particle size on small-strain shear modulus of granular soils

Under small strains the shear-wave velocity (Vs) and its resultant maximum shear modulus (Gmax) are important parameters in geotechnical engineering soil dynamics analyses. In this regard, the evaluation of the influences of soil particle size on the dynamic behaviour of soils during wave propagation has been an important issue in geotechnical engineering. According to the relevant literature, the influences of grain size on shear wave velocity of soil were completely different in various research studies. This research aims to experimentally examine the effects of a wider range of particle sizes, on maximum shear modulus in dry sandy soils, using a bender element apparatus embedded in a triaxial cell. The results indicated that maximum shear modulus of sand was considerably affected by changes in grain size so that in a particular range of grain size, shear modulus increased as the diameter of soil grains rose, while, in the other range, maximum shear modulus diminished with increasing grain diameter,.

Keywords: Shear wave velocity; Granular soil; Bender element test; Maximum shear modulus; Small-strain behavior

مقدمه

روش‌های زیادی جهت اندازه‌گیری خواص دینامیکی خاک وجود دارد. معمولا این دسته‌بندی از لحاظ نحوه اندازه‌گیری به روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی تقسیم می‌شوند. پارامترهای محاسبه شده از روش‌های فوق را می‌توان مبنایی برای بیان خواص دینامیکی در کرنش‌های کوچک و بزرگ نامید.

مدول برشی یک پارامتر بسیار مهم در توصیف رفتار خاک در محدوده کرنش‌های کوچک و بزرگ می‌باشد. همچنین سرعت موج برشی یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای تعیین مدول برشی می‌باشد. سرعت موج برشی تابعی از عوامل مختلف نظیر ۱- خصوصیات فیزیکی ذرات، شامل: شکل ظاهری، دانه‌بندی و اندازه آن ۲- حالت قرارگیری ذرات، شامل: تخلخل، دانسیته ۳- خصوصیات مکانیکی ذرات، شامل: نقاط تماس دانه‌ها، تنش‌های همه‌جانبه و دیگر پارامترها می‌باشد. [۱]

رفتار کرنش کوچک خاک در بازه کرنش کمتر از 10^{-5} تعریف می‌شود. جهت مطالعه خصوصیات دینامیکی خاک

[۱] – نویسنده مسئول: استادیار دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه sharifipour@razi.ac.ir
[۲] – دانشجوی دوره دکتری خاک و پی دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
[۳] – دانشجوی دوره کارشناسی ارشد خاک و پی دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

در محدوده کرنش‌های کوچک، از آزمایش‌های محلی ویا آزمایشگاهی استفاده می‌شود. [۲] آزمایش‌های ستون تشدید و المان‌های خمشی به عنوان آزمایش‌های آزمایشگاهی و آزمایش‌های انعکاس و انکسار لرزه‌ای، آنالیز طیفی موجها سطحی، انتشار موجها بین چاهی و درون چاهی به عنوان مهمترین آزمایش‌های سایت یا برجا مورد استفاده محققین می‌باشد.

یکی از موارد قابل بحث، تاثیر اندازه دانه‌های خاک بر سرعت موج برشی در خاک و متعاقب آن مدول‌برشی می-باشد. همان‌طور که در رابطه پیشنهادی هاردین و ریچارد [۳] برای مدول برشی مشاهده می‌شود (رابطه۱)، ضریب A و n به عوامل مختلفی از جمله ضریب یکنواختی، اندازه و شکل دانه‌ها بستگی دارد.

$$G_{max} = \mathrm{A} \times \mathrm{f(e)} \times \left(\frac{p'}{p_a}\right)^n \qquad (۱)$$

در این رابطه: p' فشار موثر، p_a فشار اتمسفر و f(e) تابع تخلخل خاک می‌باشد.

محققین نظرهای متفاوتی در خصوص تاثیر اندازه دانه-های خاک بر سرعت موج برشی و مدول برشی دارند. در ادامه به برخی از این دیدگاه‌ها اشاره می‌شود.

در سال ۱۹۷۷ آیواساکی و همکاران با استفاده از آزمایش ستون تشدید اثر اندازه دانه‌های محلی ژاپن و ماسه تویورا را روی مدول برشی ماسه بررسی‌نمودند. نتایج حاکی از عدم وابستگی مدول برشی به اندازه دانه‌های خاک می باشد[۴].

دلیا و همکاران در سال ۱۹۹۶ مدول برشی سه نمونه خاک در ایتالیا را اندازه‌گیری نمودند. نتایج نشان دهنده افزایش مدول برشی با افزایش اندازه دانه‌های خاک می-باشد[۵].

شانگ یو در سال ۲۰۰۰ مدول برشی خاک‌های شنی تایوان در اندازه‌های مختلف را با استفاده از آزمایشات سه محوری دینامیکی بزرگ مقیاس، ستون تشدید و انتشار موج‌ها اندازه گیری و نشان داد، در تنش همه جانبه ثابت با افزایش قطر دانه های خاک، مدول برشی خاک افزایش می یابد[۶].

منک و استوکوئه (۲۰۰۳) با استفاده از دستگاه ستون تشدید دریافتند در تخلخل و فشار همه‌جانبه ثابت با افزایش اندازه‌ی میانگین دانه‌های خاک ماسه‌ای مقادیر مدول برشی نیز اندکی افزایش می‌یابد[۷].

شریفی پور و همکاران در سال ۲۰۰۴ با بکارگیری تکنیک المان خمشی در سلول سه محوری و انتشار موجها در گوی‌های شیشه‌ای به اندازه ۱، ۲ و ۳ میلیمتر نشان‌دادند، با افزایش قطر گوی های شیشه ای، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد[۸].

سال ۲۰۰۴ ساهاپول و همکاران مدول برشی ماسه تویورا و خاک‌های آتشفشانی ژاپن را با استفاده از آزمایش‌های سه محوری سیکلی و المان خمشی اندازه‌گیری نمودند. با اینکه اندازه متوسط دانه های خاک توهورو (خاک محلی) درشت‌تر از ماسه تویورا می‌باشد، اما مدول برشی آن کمتر از ماسه تویورا محاسبه گردید[۹].

در سال ۲۰۰۵ هاردین و همکاران نسبت به اندازه‌گیری مدول برشی خاک‌های مختلف (سنگ آهک شنی خرد شده، شن رودخانه‌ای، ماسه اوتاوا، سنگ آهک ماسه‌ای خرد شده و مخلوط ماسه-شن-سیلت) با استفاده از ستون تشدید اقدام نمودند. نتیجه این تحقیقات نشان می دهد، با افزایش اندازه قطر متوسط دانه‌های خاک مقدار مدول برشی بیشتر می‌شود [۱۰].

اندازه‌گیری سرعت موجها برشی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از دستگاه المان خمشی در سال ۲۰۰۵ توسط تای و همکاران حاکی از افزایش سرعت موج برشی با افزایش

قطر دانه‌های خاک می‌باشد[۱۱].

بارتاک و سینگ در سال ۲۰۰۷ با استفاده از دستگاه المان‌خمشی افزایش اندازه دانه‌های ماسه خشک را موجب کاهش مدول برشی دانستند[۱۲].

طبق نتایج اعلامی پاتل و همکاران در سال ۲۰۰۸ افزایش قطر گوی های شیشه ای ۰،۵، ۱،۵ و ۲،۵ میلیمتری در دستگاه المان خمشی موجب کاهش سرعت موج برشی می‌شود[۱۳].

سال ۲۰۰۸ کوسکی و همکاران مقدار سرعت موج برشی ماسه تویورا و شن هایم را با استفاده از آزمایش المان خمشی اندازه گیری نمودند. نتایج حاکی از عدم تغییر سرعت موج برشی با افزایش اندازه دانه های خاک است[۱۴].

در سال ۲۰۰۹ پاتل و همکاران باز هم با استفاده از دستگاه المان خمشی سرعت موج برشی سه نمونه خاک با اندازه ۱، ۲ و ۳ میلیمتر، در دو حالت خشک و اشباع اندازه-گیری کردند. نتایج حاکی از کاهش سرعت موج برشی با افزایش قطر دانه‌ها در هر دو حالت خشک و اشباع می-باشد[۱۵].

در سال ۲۰۰۹ ویچمن و همکاران عنوان نمودند با تغییر اندازه دانه‌های خاک در تخلخل و ضریب یکنواختی ثابت، مدول برشی خاک ثابت می‌ماند[۱۶].

سال ۲۰۱۳ یانگ و همکاران [۱۷] وابستگی مدول برشی به اندازه دانه‌های خاک را با استفاده از المان خمشی و ستون تشدید در تراکم های مختلف خاک بررسی نمودند. در این مطالعه از گوی‌های شیشه‌ای با اندازه قطرهای مختلف استفاده نمودند. در حالت متراکم هردو آزمایش المان خمشی وستون تشدید تا اندازه دانه‌های ۱ میلیمتر، مدول برشی کاهش نامحسوس (مخصوصاً تحت فشارهای همه جانبه کم) و پس از آن بصورت جزئی افزایش می‌یابد. در حالت تراکم متوسط تا ۱ میلیمتر باز هم در هردو آزمایش المان خمشی وستون تشدید مدول برشی بصورت جزئی کاهش، و از آن به بعد در المان خمشی مدول برشی کاهش و در ستون تشدید مدول برشی افزایش می‌یابد. در حالت تراکم کم، در هردو آزمایش ستون تشدید و المان خمشی با افزایش اندازه قطر متوسط دانه‌ها، مدول برشی خاک کاهش می‌یابد.

جو و همکاران در سال ۲۰۱۳ مقدار مدول برشی سه نوع ماسه خشک را با استفاده از دستگاه المان خمشی اندازه-گیری کردند. نتایج حاکی از کاهش مدول برشی با افزایش قطر دانه‌ها در تنش‌های همه جانبه یکسان می‌باشد[۱۸].

کانگ و همکاران تاثیر عوامل موثر بر سرعت موج برشی (اندازه‌ی ذرات و تنش‌های اعمالی) را در سال ۲۰۱۴ بررسی و عنوان نمودند، با افزایش اندازه دانه‌ها سرعت موج برشی نیز افزایش می‌یابد[۱۹].

در سال ۲۰۱۴ لیو و یانگ تاثیر ریزدانه بر مدول برشی به وسیله دستگاه ستون تشدید و المان خمشی را روی ماسه ی تمیز تویورا و سیلیکات خرد شده به همراه درصدهای مختلف ریز دانه از ۵ تا ۳۰ درصد انجام دادند، نتایج منجر به کاهش مدول برشی با افزایش ریزدانه گردید[۲۰].

چو و همکاران سال ۲۰۱۴ افزایش اندازه دانه‌های خاک را موجب کاهش میزان مدول برشی دانستند[۲۱].

سنتاکیس و همکاران در سال ۲۰۱۵ مدول برشی خاک-های مختلف را با استفاده از المان خمشی اعلام نمودند، اندازه دانه‌ها روی مدول برشی موثر نمی‌باشد[۲۲].

سال ۲۰۱۵ پرادهان و همکاران مقدار سرعت موجها برشی خاک‌های دانه‌ای با استفاده از المان خمشی و روش المان گسسته اندازه‌گیری نمودند. در این مطالعه از سه نمونه دانه‌های سیلیکا، گوی‌های شیشه‌ای و خاک ماسه‌ای

اسـتفاده نمودند، نتایج تاثیر شـکل، اندازه و نوع مصالح را روی سرعت موج برشی را نشان می‌دهد [۲۳].

سال ۲۰۱۶ پایان و همکاران ضمن اصلاح فرمول مرجع [۲] اثر شـکل و اندازه دانه‌ها را روی مقدار مدول برشـی موثر دانستند[۲۴].

دستاورد محققین مذکور تقریبا به چهار بخش مجزاء بصورت ذیل قابل دسته بندی است:

۱- با افزایش اندازه دانه های خاک، سرعت موج برشی افزایش می‌یابد. ۲- با افزایش اندازه دانه‌های خاک، سرعت موج برشی کاهش می‌یابد. ۳- سرعت موج برشی مستقل از در اندازه دانه‌های خاک می‌باشد. ۴- در یک محدوده از اندازه دانه‌ها، با افزایش قطر متوسط دانه‌های خاک سرعت موج برشی افزایش و در محدوده دیگر با افزایش آنها سرعت موج برشی در خاک کاهش می‌یابد.

وجه تمایز این پژوهش با سایر پژوهش‌ها بررسی دامنه گسترده‌ای از اندازه‌ی دانه‌ها به همراه بررسی ساختار و شکل فیزیکی آنها با استفاده از دستگاه المان خمشی است. در پژوهش‌های گذشته تنها به اندازه‌ی خاصی محدود بوده و با توجه به اهمیت مدول برشی به عنوان مبنای محاسبات نظری و عملی و جایگاه ویژه‌ی این پارامتر در ژئوتکنیک، رویکرد این پژوهش رسیدن به وضعیتی بهینه از نظر فنی و اقتصادی برای دست‌یافتن به مدول برشی دقیق‌تر و متناسب برای دانه بندی‌های مختلف خاک می‌باشد.

دستگاه مورد استفاده، مصالح و روشها

۱- دستگاه آزمایش

استفاده از آزمایش المان‌های خمشی در راستای بررسی رفتار دینامیکی خاک‌ها گسـترش یافته اسـت. المان‌های خمشی دارای دو قطعه پیزوالکتریکی متصل به یک صفحه فلزی مرکزی می‌باشـند. با توجه به خصـوصـیات پیزو الکتریکی، این قطعه‌ها توانایی تبدیل ارتعاش‌های مکانیکی به بارهای الکتریکی و بالعکس را دارند.

در یک سلول المان خمشی و کششی یک جفت المان پیزو الکتریک استفاده می شود. یک المان پیزو الکتریک به عنوان فرستنده موج برشی و همچنین گیرنده موج فشاری و دیگری به عنوان فرستنده موج فشاری و گیرنده موج برشی بکارگرفته می‌شود.

دسـتگاه المان خمشـی از قطعه‌ها وکاربردهای زیر تشکیل شده است

سلول فشار: برای نگهداری نمونه و اعمال فشار همه‌جانبه

تیغه‌های فرستنده و گیرنده‌ی موج: برای ارسال و دریافت موجها برشی و فشاری.

دستگاه سازنده‌ی تابع موجها: این دستگاه برای ایجاد انواع موج‌های سـینوسـی، مربعی، مثلثی و ... به صورت پیوسته وتـک پـالس با قابلیت تعیین فرکانس‌های مختلف و طول مـوج‌هـای دلـخـواه اسـتـفـاده مـی‌شـود.

دسـتگاه اوسـیلوسکوپ: این دستگاه جهت نمایش موجها دریافتی ونیز تجزیه تحلیل بصـری موج و محاسـبه زمان سفرموج به کار می‌رود.

تقویت کننده‌ی موج‌ها: از آنجایی که در اثر میرایی، موجها دچار کاهش دامنه می‌شـوند لازم اسـت به وسـیله ای این دسـتگاه دامنه‌ی موج‌های تشـدید شده تا به خوبی توسط دستگاه گیرنده درک شوند.

دسـتگاه سـه محوری مورد اسـتفاده متعلق به شـرکت اسـتارسـنت آلمان و مجموعه المان خمشی ساخت شرکت آبرفت پی آژند ایران می باشـد. در شـکل (۱) دسـتگاه المان خمشـی که روی دستگاه سه محوری نصب گردیده مشاهده می‌شود.



شکل(۱): دستگاه المان خمشی مورد استفاده

۲- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده ماسه‌ی رودخانه‌ای مربوط به بخش دینور واقع در شمال شرقی شهرستان کرمانشاه کشور ایران بوده که به وسیله الک‌های استاندارد ASTEM تجزیه و دسته بندی گردید. دانه‌ها پس از تجزیه در ۱۰ دسته با قطرهای مشخص مطابق جدول (۱) و شکل(۲) طبقه بندی شدند.

جدول(۱):دسته بندی دانه‌ها

ردیف	نام دسته	اندازه دانه‌ها (mm)	سایز معرف (mm)
۱	R1	۰,۱۵-۰,۳۰	۰,۲۳
۲	R2	۰,۳۰-۰,۴۲	۰,۳۶
۳	R3	۰,۴۲-۰,۶۰	۰,۵۱
۴	R4	۰,۶۰-۰,۸۵	۰,۷۳
۵	R5	۰,۸۵-۱,۱۸	۱,۰۲
۶	R6	۱,۱۸-۱,۴۰	۱,۲۹
۷	R7	۱,۴۰-۲,۰۰	۱,۷۰
۸	R8	۲,۰۰-۲,۳۶	۲,۱۸
۹	R9	۲,۳۶-۴,۷۵	۳,۵۶
۱۰	R10	۴,۷۵-۹,۵۳	۷,۱٤

برای هر دسته از ذرات با اندازه‌ی مشخص، بصورت جداگانه آزمایش‌های توده‌ی ویژه و تخلخل بیشینه و کمینه و المان خمشی انجام که نتایج در جدول شماره (۲) نشان داده شده است.

باتوجه به اینکه اندازه‌های قطر خاک بین دو الک دارای بازه مشخصی هستند، در نمودارها از یک اندازه بعنوان نماینده رنج مورد نظر استفاده شده است. موضوع در ستون آخر جدول (۱) ذکر شده است.

۳- روش انجام آزمایش

در بررسی‌ها نسبت تخلخل و رفتار خاک بستگی زیادی به روش نمونه سازی و بافت خاک دارد. همگن و یکسان بودن تخلخل خاک نقش مهمی در نمونه‌سازی دارد، لذا باید تمهیداتی اتخاذ شود که بتوان به بیشترین میزان همگنی درنمونه‌سازی دست یافت. در آزمایشگاه روشهای مختلفی از قبیل: روشهای بارش خشک، تراکم مرطوب، رسوبگذاری در آب و تراکم کاهش یافته وجود دارد.

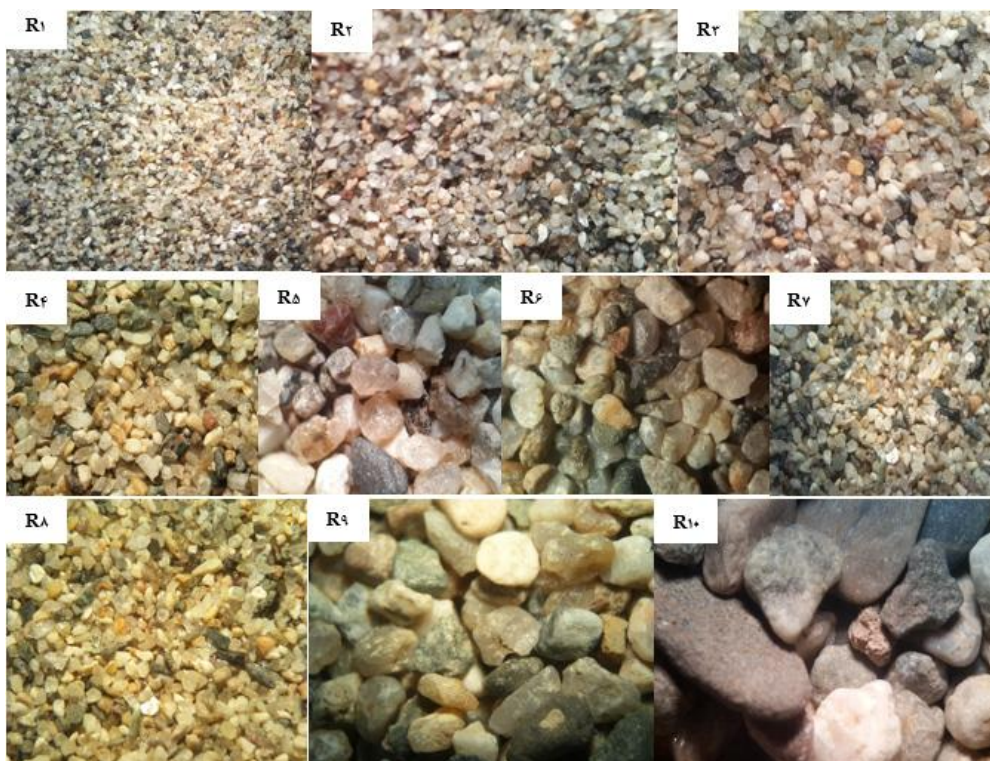
در روش نمونه‌سازی آزمایش‌ها با ریختن هر لایه و کوبش آن لایه پایینی کمی متراکم‌تر می‌گردد ، در انتهای کار چگالی نمونه مدل ساخته شده با عمق متغیر و مدل غیر همگن می‌شود. راه‌حل جلوگیری از این مشکل استفاده از روش تراکم کاهش یافته ارائه شده توسط لاد و همکاران می‌باشد. در تحقیق حاضر این روش استفاده‌شده‌است[۲۵].

وقتی خاک در چند لایه متراکم می‌شود، تراکم لایه‌های بعدی باعث افزایش دانسیته خاک موجود در زیر آن لایه می‌گردد. تراکم لایه دوم باعث تراکم بیشتر لایه اول و تراکم لایه سوم باعث افزایش تراکم لایه های اول و دوم می‌شود. لذا جهت ساخت نمونه‌های با تراکم یکنواخت، روش تراکم کاهش یافته مطرح شده است. در این روش به طور کلی هر لایه با دانسیته کمتر از آنچه در نهایت مورد نظر است، کوبیده می‌شود.

با توجه به رابطه (۱) تخلخل خاک نقش اساسی و مهمی در تعیین مدول برشی خاک در حالت کرنش کوچک ایفا می‌کند. در این پژوهش تمامی نمونه ها حتی الامکان با تخلخلی یکسان و به صورت همگن ساخته شده‌اند. برای تمام اندازه دانه ها مقادیر تخلخل کمینه و بیشینه اندازه‌گیری و برای کلیه نمونه‌ها تخلخل میانگین $e_b=$ ۰,۸ در نظر گرفته شد.

نمونه‌های ساخته شده تحت تنش همه جانبه در گام‌های

۵۰ کیلوپاسکال تا تنش نهایی ۵۰۰ کیلوپاسکال قرار داده و سرعت موج برشی در فرکانس‌های مختلف برای هر گام اندازه‌گیری شد. در شکل (۳) یک نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل(۲): تصویر نمونه های ماسه با استفاده از میکروسکوپ نوری (2000X)

جدول(۲): مشخصات مصالح و نمونه های مورد استفاده

نام گروه	قطر متوسط (میلیمتر)	دامنه وزن مخصوص خشک (گرم بر سانتی متر مکعب)		دامنه تخلخل		تخلخل مورد آزمایش	توده ویژه	تراکم نسبی	تعداد نمونه های تکرای
		حداکثر	حداقل	بیشینه	کمینه				
R1	۰/۲۲۵	۱/۴۷	۱/۲۵	۱/۱۲	۰/۸	۰/۸	۲/۶۵۹	۱۰۲	۳
R2	۰/۳۶۳	۱/۵۱	۱/۲۹	۱/۰۶	۰/۷۶	۰/۸	۲/۶۵۹	۸۷/۸	۳
R3	۰/۵۱۳	۱/۵۳	۱/۳۳	۱	۰/۷۴	۰/۸	۲/۶۴۸	۷۶	۳
R4	۰/۷۲۵	۱/۵۵	۱/۳۴	۰/۹۸	۰/۷۲	۰/۸	۲/۶۵۴	۶۸/۳	۳
R5	۱/۰۱۵	۱/۵۶	۱/۳۶	۰/۹۶	۰/۷۱	۰/۸	۲/۶۴۹	۶۲/۱	۳
R6	۱/۲۹	۱/۵۹	۱/۳۹	۰/۹۱	۰/۶۷	۰/۸	۲/۶۴۹	۴۵/۷	۳
R7	۱/۷	۱/۵۷	۱/۳۷	۱/۹۳	۰/۶۹	۰/۸	۲/۶۳۸	۵۲/۴	۳
R8	۲/۱۸	۱/۵۷	۱/۳۸	۰/۹۱	۰/۶۹	۰/۸	۲/۲۴۵	۴۹/۸	۳
R9	۳/۵۶	۱/۶۲	۱/۴۳	۱/۸۵	۰/۶۳	۰/۸	۲/۲۴۶	۲۲/۳	۳
R10	۷/۱۴	۱/۵۹	۱/۴۱	۰/۸۸	۰/۶۷	۰/۸	۲/۶۵۹	۳۷	۳



شکل (۳): نمونه ساخته شده جهت انجام آزمایش

اندازه‌گیری‌ها به وسیله‌ی دستگاه المان خمشی در سلول سه محوری با استفاده از یک منبع مولد سیگنال و یک اوسیلسکوپ صورت‌گرفته‌است. زمان سفر موج (Δt) به روش همبستگی متقابل از روش‌های حوزه‌ی زمان می‌باشد. از طریق فرمول $V = {L_{tt}}/{\Delta t}$ سرعت موج برشی(V_s)و میزان مدول برشی ماکزیمم (G_{max}) را از طریق رابطه $G_{max} = \rho V_s^2$ محاسبه گردید.

روش‌های محاسبه زمان سفر موج به زیر بخش‌های الف) روش شروع تا شروع ب) روش نقطه اوج تا نقطه اوج و ج) روش تابع همبستگی متقابل تقسیم می‌شوند.

روش شروع تا شروع رایج‌ترین روش تفسیر موج است. این روش اولین انحراف مثبت سیگنال دریافت شده از دامنه‌ی صفر را بعنوان زمان ورود موج برشی (t_0) درنظرمی‌گیرد. از ایرادهای اصلی این روش، عدم معلوم بودن نقطه‌ی سیگنال ورودی بعلت اثر حوزه نزدیک می‌باشد.

در روش نقطه اوج تا نقطه اوج زمان سفر موج برشی بعنوان فاصله‌ی زمانی بین قله‌ی مثبت سیگنال ارسال شده و اولین قله‌ی بزرگ روی سیگنال دریافت شده تعریف می‌شود. با توجه به اثر پراکندگی ناشی از هندسه‌ی نمونه و جذب انرژی طبیعت خاک، سیگنال دریافت شده با افزایش فاصله ضعیف می‌شود. این امر در تفسیر این روش مشکل ایجاد می‌کند.

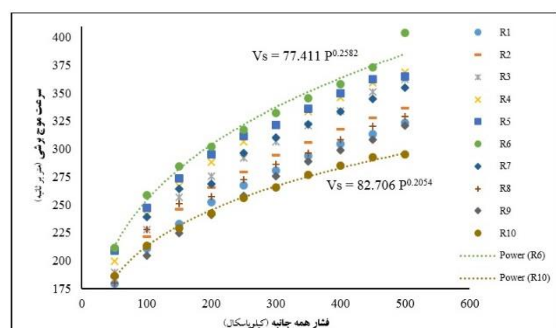
روش تابع همبستگی متقابل، برگرفته شده از روش‌های تجزیه و تحلیل معمولی سیگنال‌ها؛ برای تحلیل نتایج آزمایش المان خمشی در خاک‌ها معرفی و استفاده شد. روش همبستگی متقابل به عنوان یک روش ریاضی، تخمین قابل قبولی را در خصوص زمان سفر موج‌های برشی و طولی ارائه می‌دهد. با استفاده از این روش به راحتی می‌توان سیگنال‌های حوزه‌ی زمان را به حوزه‌ی فرکانس تبدیل نمود. تجزیه‌ی سیگنال‌ها دسته‌ای از موج‌های هارمونیک با دامنه و فرکانس مشخص را تولید می‌نماید. بطور ایده‌آل حداکثر تابع همبستگی متقابل باید بر اولین قله‌ی مثبت سیگنال دریافت شده که بیشترین مقدار را هم دارد، منطبق باشد.

برای رسیدن به نتیجه مطلوب و کاهش خطای آزمایش هر ترکیب چند بار تکرار گردید.

نتایج و بحث

در این تحقیق بنا بر هدف مقایسه‌ای نتایج تمامی نمونه‌ها با تخلخل ثابت و یکسان (e=۰٫۸) می‌باشد. از آنجایی‌که برای هر دسته از دانه‌ها مقادیر تخلخل بیشینه و کمینه یکسان نیست. تراکم نسبی نمونه‌ها نیز با یکدیگر برابر نبوده و هر دسته از دانه‌ها دارای تراکم نسبی متفاوت اما نسبت تخلخل یکسانی می‌باشند.

تغییر مدول برشی ماکزیمم برای ۱۰ نوع دانه بندی مختلف از قطر ۰٫۲۲۵ میلیمتر تا ۷٫۱۴ میلیمتر و از فشار ۵۰ کیلوپاسکال تا ۵۰۰ کیلوپاسکال اندازه گیری و نتایج آن در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴): تغییرات مدول برشی با فشارهمه جانبه برای نمونه های مختلف.

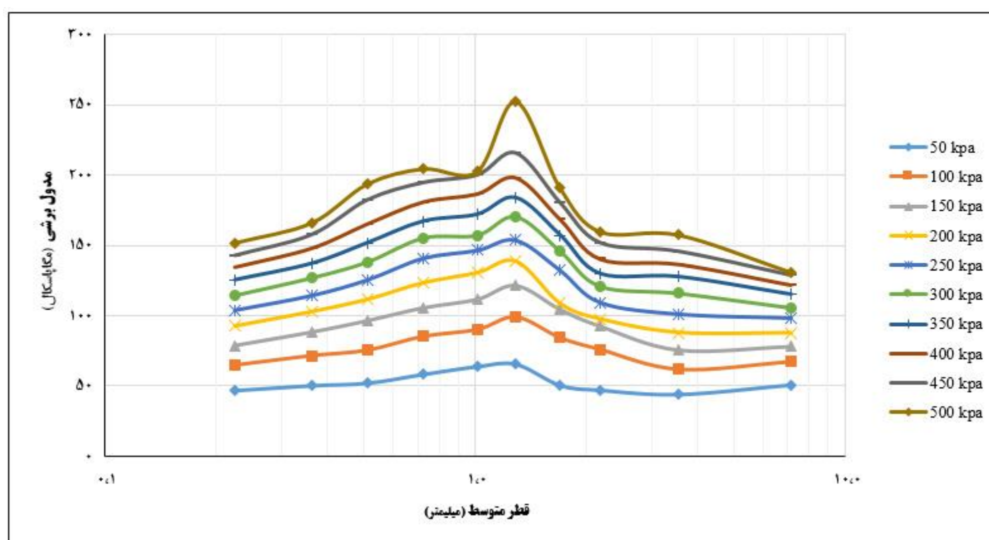
همانگونه که از شکل(۴) استنباط می‌گردد، برای تمامی اندازه دانه ها با افزایش فشـــار همه جانبه مدول برشـــی افزایش می‌یابد. علت عمده آن بیشتر شدن نقاط تماسی و اصـطکاک میان دانه‌ای ذرات در فشـارهای بالاتر می‌باشد. در شـکل (۵) نتایج تغییرات سرعت موج با افزایش اندازه دانـه‌های خاک مشـــاهده می‌شـــود. در بازه‌ای از ابعاد افزایش اندازه دانه‌ها سرعت موج برشی افزایش و در بازه دیگر ســرعت موج برشــی کاهش یافته اســت. بطوری‌که برای قطر ۰,۲۲۵م.م تـا ۱,۲۹ م.م با افزایش قطر متوســط دانه‌ها ســرعت موج برشــی افزایش و از قطر ۱,۲۹ م.م تا قطر ۷,۱۴ م.م بـا افزایش قطر متوســط دانـه‌ها ســـرعت موج‌برشی کاهش می‌یابد.

در شاخه صعودی شکل(۵) از اندازه با افزایش قطر دانه‌ها برای تمامی فشــارهای همه جانبه ســرعت موج برشـــی افزایش می‌یـابـد. همانگونه که می‌دانیم این افزایش اندازه میانگین دانه‌ها موجب کاهش ضریب یکنواختی و به دنبال آن باعث افزایش ســـرعت موج برشـــی و مدول برشـــی می‌شود. از دیگر توجیهات این افزایش می‌توان به افزایش نقاط تماســـی بین دانه ها و تئوری تماســـی هرتز اشـــاره کرد[۸].

در شـاخه نزولی شکل (۵) با افزایش اندازه دانه‌ها سرعت موج برشی و مدول برشی کاهش می‌یابد.

از عوامـل تـاثیر گذار در این پدیده می‌توان به کاهش قفل وبســـت دانه‌ها و اصـــطکاک داخلی اشـــاره کرد. برخلاف انتظـار علیرغم افزایش انـدازه دانـه‌هـا و در نتیجه افزایش قفل بســت بین آنها، ســرعت موج برشــی کاهش یافته، که این امر ناشـــی از حذف دانه‌های پرکننده و طولانی شـــدن مسیر انتشار موج است.

در جـدول(۳) نتـایج این تحقیق بـا یـافتـه‌هـای دیگر محققین مقایسه گردیده است. در بعضی دامنه‌ها این نتایج با نتایج دیگران مطابقت داشـــته و در دامنه‌ی دیگر تناقض دارد. نـتـایـج ایـن پژوهش بـا یـافتـه هـای منـک و اســـتـوکـوئـه(۲۰۰۳)، شـــریـفـی پـور و همکـاران(۲۰۰۶)،هـاردین(۲۰۰۵) و کنـگ (۲۰۱۴) ، تـا انـدازه ۱,۲۹ میلیمتر از نظر رفتـاری مطـابقت و با افزایش اندازه دانه‌ها مدول برشـــی نیزافزایش می‌یابد. **و همچنین** نتـایج ســـینـگ (۲۰۰۷)، پـاتـل و همکـاران (۲۰۰۹)، یانگ(۲۰۱۳) و لیو(۲۰۱۴) حاکی از کاهش مدول برشی با افزایش انـدازه دانـه‌ها می‌باشـــد که نتایج این پژوهش در شاخه نزولی نمودار با یافته های آن‌ها مطابقت دارد اما در قسمت صعودی با نتایج آنان در تضاد می‌باشد.



شکل (۵): تغییرات سرعت موج برشی نسبت به ابعاد دانه‌ها **در فشارهای همه جانبه مختلف**

جدول (۳): مقایسه کلی نتایج این پژوهش با یافته های دیگر محققین

منک	D(mm)	۰،۳۳	۲،۶	–	–	–	–	–	–	–	–
۲۰۰۳	Gmax	۱۰۳،۹۶	۱۴۱،۵۵	–	–	–	–	–	–	–	–
هاردین	D(mm)	۰،۰۵	۰،۰۸	۰،۱۵	۰،۹۴	۳،۶	۷،۹	–	–	–	–
۲۰۰۵	Gmax	۳۴۸	۴۳۰،۶۹	۴۶۳،۷۶	۶۷۲،۲۳	۷۷۳،۳۸	۸۳۶،۰۲	–	–	–	–
سینک	D(mm)	۰،۳۳	۰،۶۵	۱،۲۵	–	–	–	–	–	–	–
۲۰۰۷	Gmax	۱۳۱،۶	۱۱۸،۱۳	۹۲،۲۲	–	–	–	–	–	–	–
پاتل	D(mm)	۰،۵	۱،۵	۲،۵	–	–	–	–	–	–	–
۲۰۰۸	Gmax	۲۰۸،۳	۱۴۷،۷۳	۱۱۰،۹۸	–	–	–	–	–	–	–
شریفی-	D(mm)	۱	۲	۳	–	–	–	–	–	–	–
پور ۲۰۰۶	Gmax	۱۲۴،۱	۱۴۱،۷	۱۶۶،۴	–	–	–	–	–	–	–
یانگ	D(mm)	۰،۱۹۵	۰،۹۲	۱،۷۵	–	–	–	–	–	–	–
۲۰۱۳	Gmax	۲۱۶	۱۹۹،۱۱	۱۷۹،۵۵	–	–	–	–	–	–	–
لیو	D(mm)	۰،۲۴۶	۰،۴۲۷	۰،۹۶	–	–	–	–	–	–	–
۲۰۱۴	Gmax	۱۳۱	۱۲۰،۷۵	۸۱،۱۲	–	–	–	–	–	–	–
کنگ	D(mm)	۰،۰۶	۰،۲۶	۰،۴۵	۰،۵	۰،۷۳	۳	۶	–	–	–
۲۰۱۴	Gmax	۵۰،۲۶	۱۸۵،۱۲	۱۴۰،۵۲	۱۳۰،۰۸	۱۴۷،۹۸	۱۵۲،۱۴	۲۷۸،۱۸	–	–	–
تحقیق	D(mm)	۰،۲۲۵	۰،۳۶	۰،۵۱	۰،۷۲۵	۱،۰۱۵	۱،۲۹	۱،۷	۲،۱۸	۳،۵۶	۷،۱۴
حاضر	Gmax	۱۰۳،۸۲	۱۱۴،۰۴۱	۱۲۵،۲۲	۱۳۹،۷۲	۱۴۲،۳۴	۱۴۶،۵۶	۱۲۸،۶۳	۱۰۹،۲۷	۱۰۰،۱	۱۰۱،۹

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در قطر متوسط دانه‌ها از ۰،۲۲۵ تا ۱،۲۹ میلیمتر با افزایش قطر، مدول برشی افزایش و برای قطر متوسط دانه‌ها از ۱،۲۹ تا ۷،۱۴ میلیمتر با افزایش قطر مدول موج برشی کاهش می‌یابد. کاهش مدول برشی درشت دانه‌ها ناشی از حذف دانه‌های پرکننده و طولانی شدن مسیر انتشار موج می‌باشد.

این تغییر مدول برشی در دامنه‌های مختلف به دو صورت افزایشی و کاهشی خود را نشان می‌دهد. بطوری‌که بیشترین نرخ افزایش مدول برشی برای فشار ۵۰۰ کیلوپاسکال به میزان ۵۶٫۸۸ درصد و بیشترین نرخ کاهش مدول برشی برای همین فشار به میزان ۴۳٫۲۲ درصد می‌باشد.

مقایسه نتایج این تحقیق با یافته‌های پژوهش‌های گذشته حاکی از آن است که تحقیق حاضر در دامنه گسترده‌تری انجام گردیده است، مطابق جدول شماره (۳) نتایج این تحقیق با یافته‌های دیگر محققین مقایسه گردیده است و همان‌گونه که دیده می‌شود، از نظر سیر صعودی یا نزولی بودن مقدار مدول برشی با تغییر اندازه دانه‌ها، در بعضی دامنه‌ها این نتایج با نتایج دیگران مطابقت داشته و در دامنه-ی دیگر تناقض دارد. از دلایل اختلاف این تحقیق با برخی محققین دیگر می توان به نوع دانه های خاک (مصنوعی یا طبیعی بودن دانه ها) و اختلاف در میزان تخلخل خاک اشاره نمود.

اکثر محققین دامنه محدودی از اندازه دانه‌های خاک را برای بررسی تاثیر اندازه دانه‌ها روی سرعت موج برشی و یا مدول برشی مورد مطالعه قرار داده اند. عدم مطالعه دامنه گسترده از ذرات مانع از اظهارنظر قطعی در خصوص تاثیر اندازه دانه‌ها روی سرعت موج برشی یا مدول برشی خاک شده است. در این تحقیق با استفاده از دستگاه المان خمشی نسبت به بررسی تاثیر اندازه دانه‌ها در دامنه وسیعی از آنها بر روی سیگنال‌های دریافتی، محتوی فرکانس سیگنال‌های دریافتی و سرعت موج برشی در فشار همه جانبه ۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال اقدام‌شد.

در این پژوهش به تاثیر اندازه دانه‌ها پرداخته شده است اما صرفاً این عامل به تنهایی نقش تعیین کننده نداشته و به نظر می‌رسد که جنس ذرات، شکل ذرات و ویژگی‌های سطوح آن‌ها نیز می‌توانند نقش‌هایی را ایفا کنند.

بررسی نتایج این تحقیق حاکی از تاثیر تغییر اندازه‌دانه‌ها روی مدول برشی خاک می‌باشد. مدول برشی G_{max} مبنای بسیاری از محاسبات نظری، آزمایشگاهی و طراحی‌های ژئوتکنیکی مانند محاسبات تغییرشکل‌ها، پایداری شیب‌ها و ارزیابی روانگرایی و تحلیل پاسخ حرکات زمین و بسیاری از اندازه‌گیری ها می‌باشد. بنابراین نتایج حاصله از این پژوهش می‌تواند به خوبی در زمینه‌های ذکر شده مورد استفاده قرار گیرد.

در انجام آزمایش‌ها فرضیه‌ها و محدودیت‌های مانند اعمال محیط الاستیک و رفتار خطی برای خاک، عدم توانایی دستگاه در اندازه گیری دانه های درشت شنی و همچنین تغییر تخلخل یکسان نمونه ها در هنگام فشار همه جانبه وجود داشت.

مراجع

1- Kramer, S. L. (1996) “Geotechnical earthquake engineering” Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J

2- Atkinson, J. H. & Sallfors, G. (1991) "Experimental determination of soil properties" Proc. 10th ECSMFE, Folrance, Vol. 3, 915-956

3- Hardin, B. O. & Richart, F. E. (1963). Elastic wave velocities in granular soils. J. Soil Mech. Found. Engng Div. ASCE 89, No.SM1, 39–56.

4- Iwasaki Toshio, Fumio Tatsuoka, (1977) " Effect of grain size and grading on dynamic shear moduli of sand" Soil and foundations, Vol. 17, No. 3.

5- B. Delia and G. Lanzo, (1996) "Laboratory and field determinations of small-strain shear modulus of natural soil deposits" Eleventh World Conferrnce on Earthquake Engineering.

6- Shang-Yuh Lin, Ping Sien Lin, Hong-Su Luo, and C. Hsein Juang, (2000) " Shear modulus and damping ratio characteristics of gravelly deposits" Can. Geotech. J. 37: 638–651

7- Menq. F. Y, Stokoe. K. H, (2003) “Linear dynamic properties of sandy and gravelly soils from large-scale resonant tests.” Swets & Zeitlinger, Lisse, 63–71.

8- Shahrifipour, M & Dano, C. (2006) "Effect of grains roughness on waves

19- Kang. X, Bate. B, GeL, (2014) "Characterization of Shear Wave Velocity and Its Anisotropy in Uniform Granular Materials" Geo-Congress 2014 Technical Papers, GSP 234 © ASCE; (2014); 2029-2041.
20- Liu. X, Yang. J, (2014), "Shear wave velocity and shear modulus of silty sand" Japanese Geotechnical Society Special Publication; (2014)907-910.
21- H. Choo , S.E.Burns, (2014) " Effect of overconsolidation ratio on dynamic properties of binary mixtures of silica particles" Soil Dynamic sand earthquake engineering 60, 44-50.
22- K. Senetakis, B.N.Madhusudhan,(2015) " Dynamics of potential fill–backfill material at very small strains" Soils andFoundations5;55(5):1196–1210.
23- Asheesh Pradhan1, and Xinbao Yu, (2015) " Bender Element Testing and Discrete Element Modeling of Shear Wave in Granular Media " ASCE.
24- Meghdad Payan, Arman Khoshghalb, Kostas Senetakis, Nasser Khalili. (2015) " Effect ofshape and validity of Gmax models for sand: A critical" Computers and Geotechnics 72 , 28–41
25- Ladd, R., "Preparing Test Specimens Using Undercompaction," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, 1978, pp. 16-23.

velocities in granular packings" First Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures – Hammamet 3-5 May Tunisia.
9- Sahaphol T, S. Miura (2004) " Shear moduli of volcanic soils " Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 157–165.
10- Bobby O. Hardin1 and Michael E. Kalinski, (2005) " Estimating the Shear Modulus of Gravelly Soils" J. Geotech. Geoenviron. Eng. 131:867-875.
11- Tae-Hyuk Kwon† and Gye-Chun Cho, (2005) " Smart geophysical characterization of particulate materials in a laboratory " Smart Structures and Systems, Vol. 1, No. 2. 217-233.
12- Bartake, P. P. & Singh, D. N. (2007), "Studies on the determination of shear wave velocity in sands". Geomech. Geoengng 2, No. 1, 41–49.
13- Patel, A., Bartake, P. P. & Singh, D. N. (2008). An empirical relationship for determining shear wave velocity in granular materials accounting for grain morphology. Geotech. Test. J. 32, No. 1, 1–10.
14- Ruta Ireng WicaksonoI, Yukika Tsutsum, Takeshi Sato, Junichi Koseki, and Reiko Kuwano, (2008) " Laboratory wave measurements on toyoura sand and hime gravel " Bulletin of ERS, No. 41.
15- A. Patel P. P. Bartake, and D. N. Singh, (2009) " An Empirical Relationship for Determining Shear Wave Velocity in Granular Materials Accounting for Grain Morphology " Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, No. 1.
16- Wichtmann T and T. Triantafyllidis, (2009) ' Influence of the Grain-Size Distribution Curve of Quartz Sand on the Small Strain Shear Modulus *G*max" J. Geotech. Geoenviron. Eng.135:1404-1418.
17- J. YANG and X. Q. GU, (2013) " Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on grain size? " Ge´otechnique 63, No. 2, 165–179.
18- Xiaoqiang Gu, JunYang, MaosongHuang, (2013) " Laboratory measurements of small strain properties of dry sands by bender element " Soils and Foundations; 53(5):735–745.